

Разработка и практическая реализация установки внутреннего освещения с возможностью передачи данных видимым светом¹

С. ЧАТТЕРДЖИ, Б. РОЙ¹

Джадавпурский университет, Колката, Индия

¹E-mail: broy@ee.jdvu.ac.in

Аннотация

Основанные на светодиодах установки офисного освещения могут использоваться для передачи данных. Эта статья посвящена созданию как экономичного управляемого входными данными устройства управления для светодиодов, обеспечивающего возможность передачи данных, так и соответствующего приёмного устройства. Кроме того, в статье подробно описано применение предлагаемой системы передачи данных видимым светом в офисах, в которых задача осложняется наличием внешней засветки. Полученные результаты продемонстрировали обеспечение удовлетворительных уровня и равномерности горизонтальной освещённости в пределах всей рабочей области. Кроме того, для оценки качества передачи данных как в реальном масштабе времени, так и в статических условиях, была разработана совмещённая с *Arduino* модель в *MATLAB Simulink*, продемонстрировавшая хорошее качество связи в части частоты ошибок по битам (10^{-7}) даже при наличии создаваемых внешней засветкой шумов при равном 6 дБ отношении сигнала к смеси помехи с шумом. При отсутствии потребности в передаче данных разработанная система может использоваться как обычная осветительная установка.

Ключевые слова: управляемое входными данными устройство управления для СД, система передачи данных видимым светом, *VLC* приёмник оптического излучения, частота ошибок по битам, *BER*, помехи, создаваемые внешней засветкой.

1. Введение

Энергетический кризис последних лет стимулировал развитие основан-

ной на светодиодах (СД) осветительной техники, что обусловлено высокими световыми отдачами и сроками службы СД [1–5]. Это резкое изменение подхода к освещению привело к вытеснению традиционных ламп из многих областей применения, особенно из области внутреннего освещения. В то же время, высокая скорость переключения этих твердотельных приборов предоставляет большие возможности в части высокоскоростной передачи данных [6]. Широкое внедрение СД освещения способствовало развитию системы передачи данных видимым светом (*VLC*) как альтернативы радиочастотным средствам связи [7, 8]. Более того, *VLC* имеет ряд преимуществ по сравнению со связью, работающей в радиочастотном или инфракрасном диапазонах длин волн, а именно:

(а) на настоящий момент нет никаких правил, регламентирующих использование видимой части спектра электромагнитного излучения;

(б) в отличие от работающих в инфракрасном диапазоне средств связи, в случае *VLC* нет никаких санитарно-гигиенических нормативных документов, накладывающих ограничения на излучаемую мощность. Так что подобную связь приветствовали бы в больницах и центрах здоровья [9].

Известно, что частота переключения белых СД меньше, чем у цветных СД, хотя она и способна обеспечить скорость передачи данных, измеряемую в Мбит/с [10, 11]. Работа беспроводного канала передачи данных видимым светом из одной точки в другую со скоростью 513 Мбит/с была описана в [12]. В другой работе было показано, что имеющие небольшую поверхность микро-СД обычно обеспечивают большую, чем их более крупные аналоги, полосу частот модуляции [13]. Так что белые СД можно рассматривать как кандидатов на использование в качестве источ-

ников света для передатчиков системы высокоскоростной ближней связи в пределах прямой видимости. Основной задачей использования белых СД в осветительных установках является обеспечение энергоэффективного освещения. Ранее были рассмотрены различные способы передачи данных видимым светом [14], однако очень немногие работы были посвящены практической реализации *VLC*, которая обеспечивала бы хорошую связь при наличии естественного освещения или сторонних искусственных источников света [15, 16]. В [17, 18] эта задача была решена в рамках компьютерного моделирования, но безотносительно к практической реализации предлагаемой системы и без учёта влияния внешней засветки, имеющей место в момент передачи данных. В [19] была достигнута меньшая чем 50 лк освещённость при равном 80 см расстоянии между передатчиком и приёмником. Обычно в случае внутреннего освещения для экономии энергии наряду с искусственным используется и естественное освещение. Так что возникает ещё и проблема передачи данных видимым светом при наличии диффузного естественного света и/или других искусственных источников света. В [16] был предложен новый приёмник оптического излучения, позволяющий уменьшить создаваемый внешней засветкой шум, что обеспечило возможность передачу данных со скоростью 10 кбит/с на расстояние 0,4 м. Однако работа этой системы в помещении не была продемонстрирована. Кроме того, для предложенной системы не была проведена оценка частоты ошибок по битам.

В отличие от предшествующих работ, здесь представлено решение, позволяющее установить систему *VLC* в офисном помещении. При этом предлагаемая система *VLC* является достаточно гибкой, чтобы при отсутствии потребности в передаче данных обеспечить возможность использования её в качестве обычного источника света. Работа этой системы связи оценивалась при наличии естественного света и сторонних искусственных источников света. Полученные результаты говорят об улучшении рабочих характеристик на расстоянии 1 м при наличии помех, создаваемых внешней засветкой. Кроме того, в пределах всех рабочих областей обеспечено выполнение предъявляемых к освещению

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

требований, таких как средняя горизонтальная освещённость и равномерность освещённости.

2. Геометрия помещения и поэтапная программа

Офисное помещение размером 7 x 6 м разделено на 6 небольших отгороженных рабочих мест (рис. 1). Ширина оставленного в помещении прохода принята равной 1,6 м, а размер рабочих областей в пределах каждого из отгороженных рабочих мест равен 1,5×0,85 м. Для каждого из отгороженных рабочих мест была выбрана своя точка доступа, характеризующаяся нулевыми межканальными помехами. Белые СД, установленные во всех точках доступа, могут передавать данные посредством модуляции их световых потоков. Кроме того, они могут обеспечивать требуемое освещение рабочей области. Кроме этих белых СД в офисном помещении установлены компактные люминесцентные лампы (КЛЛ), позволяющие обеспечить хорошую равномерность освещённости и требуемую горизонтальную освещённость во всём помещении.

Согласно стандарту ИСО [20], для офисов нормированное минимальное значение средней эксплуатационной освещённости на рабочем месте составляет 300 лк. Главная задача данной работы заключалась в том, чтобы обеспечить требуемую освещённость при меньшем расходе энергии и в то же время использовать часть источников света в качестве точек доступа, характеризующихся большей точностью передачи данных, оцениваемой по частоте ошибок по битам (*BER*). Рассеянное естественное освещение может быть совмещено с искусственным освещением для экономии энергии в дневное время. А применительно к передаче данных естественный свет является ещё и потенциальным источником помех. Так что целями данной работы являлись создание и оценка опытного образца системы, позволяющей передавать данные с минимальными ошибками даже при наличии помех, создаваемых внешней засветкой, и обеспечивающей достаточную освещённость на рабочей плоскости.

Требуемые светотехнические характеристики и качество связи обеспечиваются предлагаемой системой в результате выполнения следующей поэтапной программы:

Рис. 1. Трёхмерное изображение поддерживающей беспроводную связь (*Li-Fi*) установки для освещения отгороженных офисных рабочих мест

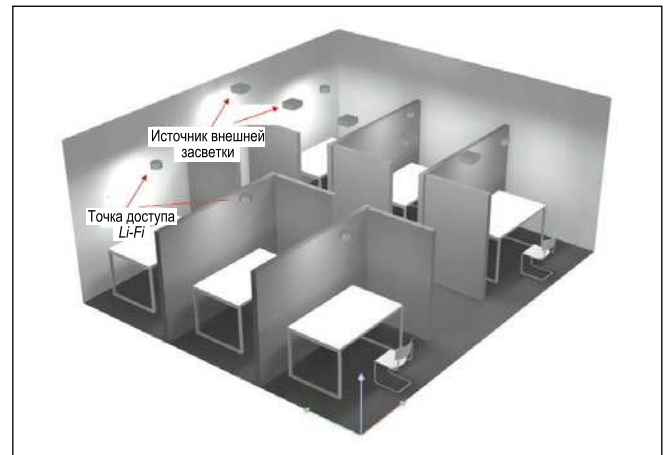


Рис. 2. План офиса (С – отгороженное рабочее место, *ALS* – сторонний источник света, *AP* – точка доступа)

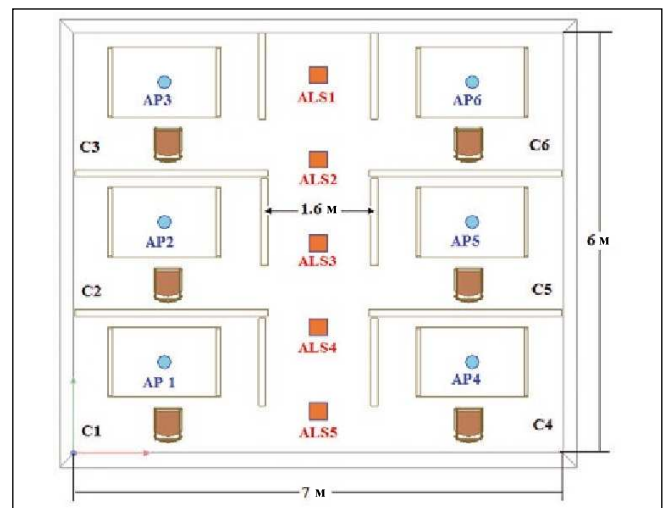
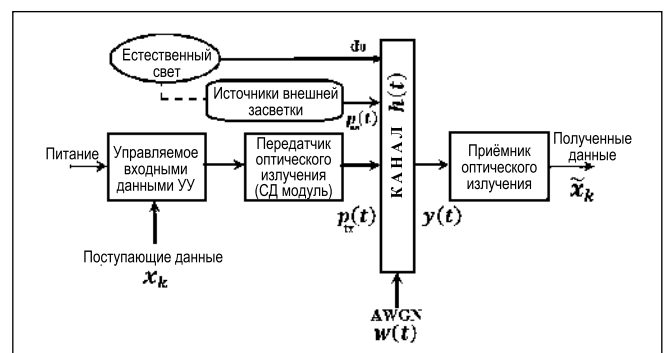


Рис. 3. Блок-схема предлагаемой системы передачи данных видимым светом (*VLC*), где *AWGN* – аддитивный белый гауссовский шум



1. Разработка дешёвого устройства управления для СД (далее – УУ), позволяющего ещё и передавать данные. Это управляемое входными данными УУ должно: а) подавать на СД модуль такие ток и напряжение, при которых обеспечивается требуемое значение освещённости, и б) работать в качестве передатчика данных.

2. Разработка приёмника оптического излучения, способного принимать передаваемые данные с подавлением шумов, создаваемых естественным светом и сторонними искусственными источниками света.

3. Моделирование в программе *DiaLux* заданного офисного пространства, состоящего из шести отгороженных рабочих мест, в целях определения вклада сторонних источников света в освещение рабочей области. План офиса приведён на рис. 2. Так как все шесть отгороженных рабочих мест (*C1 – C6*) аналогичны друг другу, а межканальные помехи во внимание не принимаются, то экспериментальное определение характеристик системы связи достаточно осуществить для одного отгороженного рабочего места.

4. Первоначальная оценка качества связи для одного отгороженного ра-

Рис. 4. Интегрированное управляемое входными данными УУ на базе LM3414

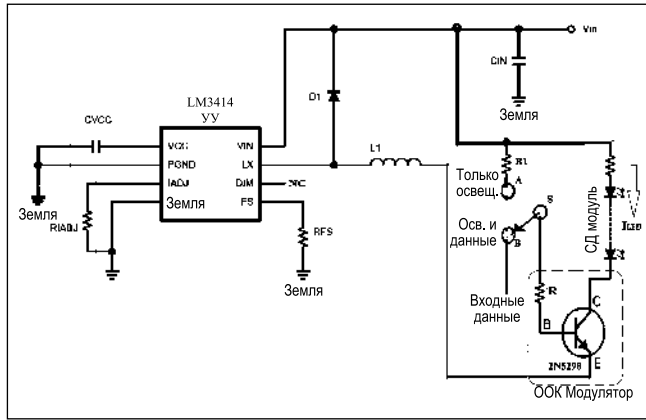
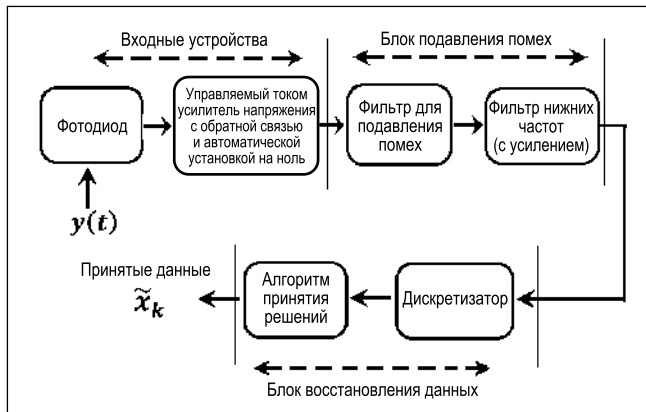


Рис. 5. Блок-схема предлагаемого приёмника оптического излучения



бочего места на основе рассмотрения передачи случайных двоичных последовательностей при наличии естественного освещения. Совокупность *MATLAB Simulink* и *Arduino* используется для проверки системы, осуществляемой в реальном масштабе времени применительно к большому потоку данных при наличии помех, создаваемых сторонними источниками света. На основе полученных экспериментальных данных производится оценка влияния этих помех на частоту ошибок по битам и отношение сигнала к смеси помехи с шумом.

3. Блок-схема оптической беспроводной системы связи

Работа оптической беспроводной системы связи определяется положением и характеристиками передатчика и приёмника, а также параметрами среды в помещении. Блок-схема разработанной оптической беспроводной системы связи приведена на рис. 3.

Входные двоичные данные оптически модулируют при помощи управляемого входными данными УУ, которое вкратце описано в разделе 4. Кроме того, это УУ подаёт на СД модуль ток, достаточный для обеспечения удовлетворяющей требованиям

ИСО средней горизонтальной освещённости. Затем оптически модулированный сигнал передаётся по беспроводному оптическому каналу связи и принимается приёмником оптического излучения. Сторонний световой поток, создаваемый естественными и искусственными источниками света, также распространяется по этому каналу и воздействует на приёмник оптического излучения как помеха. Оптический канал связи можно считать не зависящей от времени линейной безынерционной системой с имеющей конечную продолжительность импульсной реакцией [21]. При наличии естественного света эту реакцию можно описать при помощи следующей непрерывной во времени модели коммуникационного канала с шумами:

$$y(t) = h(t) * [p_{lx}(t) + p_{na}(t)] + d_0 + w(t), \quad (1)$$

где $p_{lx}(t)$ – модулированный по световому потоку сигнал, переданный СД источником света, $y(t)$ – принятый искажённый вариант переданного сигнала, $p_{na}(t)$ и d_0 – помехи, обусловленные, соответственно, сторонними источниками света и шумами, создаваемыми естественным освещением. Хотя естественное освещение по своей природе непостоянно, ско-

рость его изменения пренебрежимо мала по сравнению с $p_{lx}(t)$ и $p_{na}(t)$. Так что естественное освещение можно рассматривать в качестве напряжения смещения постоянного тока, подаваемого на приёмник оптического излучения. На стороне приёма амплитуда принятого сигнала напряжения пропорциональна взятому по площади фотодиода интегралу мощности падающего оптического излучения. Воздействующие на приёмник дробовые и тепловые шумы $w(t)$ можно считать аддитивным белым гауссовским шумом [22].

Для связи в пределах прямой видимости, которая и имеет место в рассматриваемом случае, импульсную характеристику канала $h(t)$ можно аппроксимировать при помощи нормированной и смещённой дельта-функции [23]:

$$h(t) = \frac{(m+1)A_R}{2\pi d^2} \cos^m(\varphi) \cos(\theta) \times \times \text{rect}\left(\frac{\theta}{FOV}\right) \delta\left(t - \frac{d}{c}\right), \quad (2)$$

где A_R – расстояние между СД и поверхностью приёмника, φ – угол облучения (*angle of irradiance*), θ – угол падения, c – скорость света, m – порядок диффузного распределения излучения (*order of lambertian emission*), который можно рассчитать при помощи формулы, описывающей полуширину угла излучения передатчика α_H [24, 25]:

$$\alpha_H = \cos^{-1} 0.5^{1/m}. \quad (3)$$

В случае неразветвлённого канала связи в пределах прямой видимости членом $\delta\left(t - \frac{d}{c}\right)$ можно пренебречь, и для учёта влияние канала достаточно коэффициент усиления канала для постоянной составляющей $H(0)$:

$$H(0) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) dt. \quad (4)$$

Горизонтальная освещённость в произвольной точке рабочей области любого отгороженного рабочего места E_0 равна:

$$E_0 = E_{AP} + E_{AL}, \quad (5)$$

где E_{AP} и E_{AL} – освещённости, создаваемые, соответственно, передатчи-

4. Конструкция управляемого входными данными интегрированного УУ

Управляемое входными данными интегрированное УУ представляет собой УУ особого типа, обеспечивающее как работу СД модуля при заданном значении тока, так и одновременную передачу данных посредством модулирования светового потока этого СД модуля. Электрическая схема предлагаемого УУ приведена на рис. 4. В рассматриваемом случае передача цифровых данных при помощи источника света, например СД матрицы, осуществляется посредством амплитудной манипуляции, являющейся одним из простейших методов цифровой модуляции. При этом двоичной единице соответствует короткий световой импульс, а двоичному нулю соответствует отсутствие света.

Подлежащие передаче данные подаются на штырёк «Входные данные» разработанного УУ, и при передаче данных переключатель установлен в положение В. Для передачи данных при помощи амплитудной манипуляции используется транзистор 2N5298, играющий роль высокоскоростного переключателя. Как упоминалось выше, при желании потребитель может использовать предлагаемую систему только для освещения, и при этом переключатель устанавливается в положение А. В рассматриваемом случае для формирования передатчика оптического излучения были соединены последовательно 6 СД, имеющих достаточную скорость переключения. Каждый из этих СД имел равное 2,7 В прямое напряжение и равное 700 мА максимальное значение тока. Номинальная мощность этих СД была равна 2 Вт. Обеспечение работы СД модуля при номинальном значении тока I_L (принято равным 350 мА) осуществлялось при помощи интегральной схемы LM3414, использующейся в качестве УУ постоянного тока (1 А, 60 Вт) с общим анодом и понижающим преобразователем.

LM3414 представляет собой УУ с широтно-импульсной модуляцией, включающее в себя генератор тактовых импульсов, обеспечивающий постоянную частоту переключения устройства. Частота переключения за-

Параметры управляемого входными данными УУ

Параметр	Обозначение	Значение
Входное напряжение постоянного тока	V_{in}	24 В
Прямое напряжение на СД матрице	V_{LED}	16,2 В
Средний ток СД	I_{LED}	350 мА
Частота внутреннего переключения	f_{sw}	500 кГц
Резистор выбора частоты переключения	R_{FS}	40 кОм
Резистор управления током	R_{IADJ}	8,92 кОм
Минимальная величина индуктивности L_1	L_{MIN}	25,3 мкГн

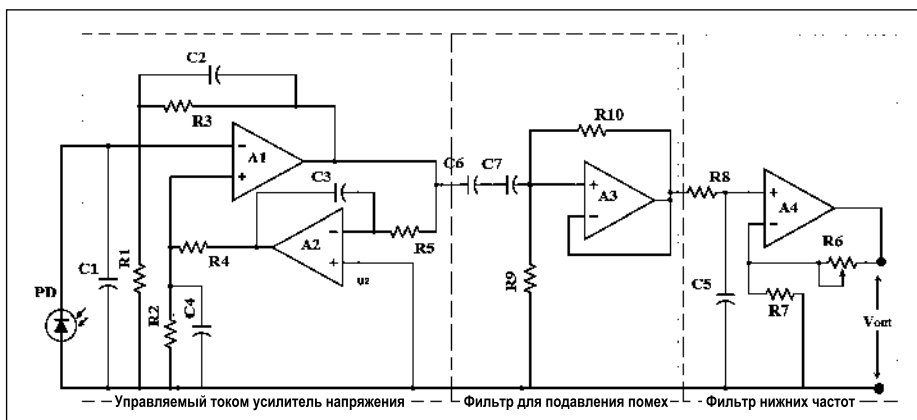


Рис. 6. Предлагаемый управляемый током усилитель напряжения с обратной связью и автоматической установкой на ноль и блок подавления помех

висит от сопротивления внешнего резистора R_{FS} и может меняться в пределах от 250 кГц до 1 МГц. При этом меньшему сопротивлению резистора R_{FS} соответствует большее значение частоты переключения. Частота переключения LM3414/14HV рассчитывают по формуле [26]:

$$f_{sw} = \frac{20 \times 10^6}{R_{FS}} \quad (6)$$

Для обеспечения должного управления током LM3414 работает в режиме непрерывной проводимости. В случае широтно-импульсной модуляции размах пульсаций тока катушки индуктивности можно задать равным вплоть до 60 % от выходного тока. Минимальная индуктивность катушки индуктивности определяется заданным средним значением тока СД и допустимым значением размаха пульсаций тока катушки индуктивности и может быть рассчитана по формуле:

$$L_{MIN} = \frac{V_{IN} - V_{LED}}{1.2 I_{LED}} \times \frac{V_{LED}}{V_{IN}} \times \frac{1}{f_{sw}} \quad (7)$$

Полученные при помощи уравнений (6) и (7) значения параметров приведены в табл. 1.

5. Конструкция приёмника оптического излучения

Блок-схема предлагаемого приёмника оптического излучения, которая приведена на рис. 5, содержит три основных блока. Входные устройства приёмника включают в себя фотодиод и управляемый током усилитель напряжения с обратной связью и автоматической установкой на ноль. Второй блок включает в себя фильтр для подавления помех, за которым следует фильтр нижних частот Баттерворта. Подробная электрическая схема этих двух блоков приведена на рис. 6.

Фотодиод обеспечивает преобразование оптического сигнала в электрический. Обратная связь и автоматическая установка на ноль, предусмотренные в управляемом током усилителе напряжения, обеспечивают поддержание равного 0 В выходного напряжения постоянного тока при отсутствии передаваемого импульса. Любой

Таблица 2

Компоненты разработанного приёмника оптического излучения

Компонент	Значение	Компонент	Значение
Фотодиод (PD)	VISHAY TEMD7000X01	Конденсатор (C1)	100 пФ
Резистор (R1)	2 кОм	Конденсатор (C2)	10 пФ
Резистор (R2)	2 кОм	Конденсатор (C3)	1000 пФ
Резистор (R3)	20 кОм	Конденсатор (C4)	10 нФ
Резистор (R4)	20 кОм	Конденсатор (C5)	0,01 мкФ
Резистор (R5)	200 кОм	Конденсатор (C6)	14 нФ
Резистор (R6)	400 Ом	Конденсатор (C7)	10 нФ
Резистор (R7)	47 Ом	Оптический усилитель (A1)	LTC6244
Резистор (R8)	1 кОм	Оптический усилитель (A2)	LTC6244
Резистор (R9)	10 кОм	Оптический усилитель (A3)	LP2904
Резистор (R10)	7,9 кОм	Оптический усилитель (A4)	LM7171

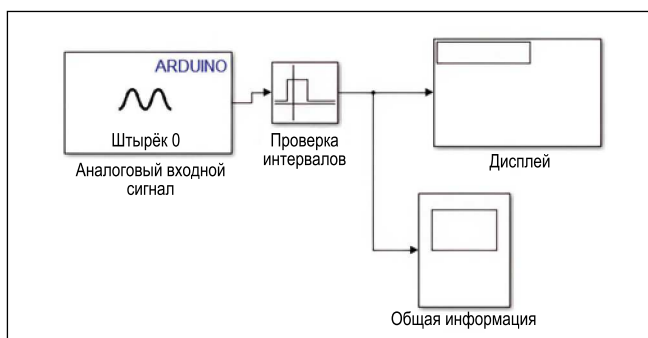
в диапазоне до 2000 Гц. Для устранения искажений, вызванных сторонними источниками света, используется фильтр для подавления помех. В сущности, это фильтр высоких частот Бесселя с единичным усилением и равной 2 кГц частотой отсечки. Следующий за ним фильтр нижних частот Баттерворта используется для обеспечения дополнительного усиления и кроме того, работает в качестве эквалайзера. Он также устраняет искажения, обусловленные переключениями, имеющими место внутри УУ. В разделе 4 упоминалось, что частота внутреннего переключения УУ (f_{SW}) была выбрана равной 500 Гц, что обеспечивает точное регулирование тока [26]. В то же время, передача данных осуществляется на частоте 30 кГц при помощи внешней схемы переключения. Обе эти частоты очевидным образом влияют на приёмник. Однако для обеспечения достоверного приёма информационного импульса необходимо устранить паразитные высокие частоты. Это достигается за счёт правильного выбора фильтра нижних частот Баттерворта. Для обеспечения дополнительного усиления и подавления высокочастотных помех частота отсечки этого фильтра нижних частот была выбрана равной 37,7 кГц при коэффициенте усиления по напряжению, равном примерно

$$20 \text{ дБ} \left[20 \log_{10} \left(1 + \frac{R6}{R7} \right) \right].$$

Экспериментальные данные говорят о хорошем совпадении формы переданного и принятого сигналов на частоте 30 кГц. При увеличении внешней частоты переключения имеет место постепенное отклонение формы принятого сигнала от формы переданного импульса. Значения характеристик всех компонентов приёмника приведены в табл. 2.

Третий и последний блок разработанного приёмника оптического излучения представляет собой устройство восстановления данных, которое включает в себя дискретизатор, за которым следует алгоритм принятия решений относительно амплитуды дискретных данных. Этот блок сформирован с использованием подерживаемого *MATLAB* микроконтроллера *Arduino*. Выходной сигнал фильтра нижних частот V_{Out} подаётся на штырёк аналогового входа

Рис. 7. Модель *MATLAB Simulink*, обеспечивающая восстановление данных при помощи *Arduino Mega*



ошибочный сигнал постоянного тока на выходе устройства *A1* генерирует противоположный сигнал на выходе устройства *A2*. Затем на неинвертирующий вход устройства *A1* подаётся корректирующее напряжение, возвращающее выходной сигнал устройства *A1* на нулевой уровень. Нижняя и верхняя граничные частоты усилителя задаются, соответственно, резистором *R5* и конденсатором *C3* и резистором *R3* и конденсатором *C2*. Ширина полосы пропускания разработанного

управляемого током усилителя напряжения равна 800 кГц при равном 10 коэффициенте усиления. Это устройство устраняет все сдвиги, обусловленные наличием естественного освещения. Второй блок предназначен для приёма слабых сигналов и устранения помех, обусловленных наличием гармоник излучения сторонних источников света (в данном случае – КЛЛ).

Реакцию фотодиода на эту помеху можно записать как [27]

$$I_{ALS}(t) = k I_{av} \sum_{i=1}^{20} \left[m_i \cos \{ (2\pi 100i - 50)t + \chi_i \} + n_i \cos(2\pi 100it + \xi_i) \right], \quad (8)$$

где I_{av} – средний ток стороннего источника света, k – коэффициент пропорциональности для определения уровня помехи, m_i и n_i – амплитуды, соответственно, нечётных и чётных гармоник при работе на частоте 60 Гц, χ_i и ξ_i – фазы, соответственно, нечётных и чётных гармоник.

Из уравнения (8) следует, что создаваемые КЛЛ помехи доминируют

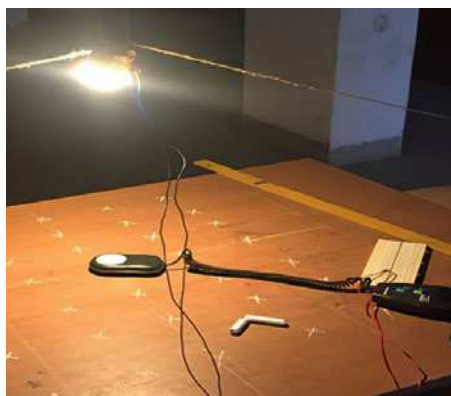


Рис. 8. Измерение освещённости на горизонтальной рабочей плоскости

платы *Arduino Mega 2560*, связанной с *MATLAB Simulink* для реализации алгоритма принятия решений. Сигнал, поступающий в *Simulink* через *Arduino*, дискретизируется и сравнивается с пороговым значением. Флажки «Ограничение диапазона справа» и «Ограничение диапазона слева» обозначают верхнюю и нижнюю границы рабочего диапазона. Рабочая модель *Simulink* показана на рис. 7. Если входной сигнал попадает в диапазон, заданный верхней и нижней границами, то на выходе будет сформирован сигнал «ИСТИНА», т.е. «1». Если же входной сигнал не попадает в этот диапазон, то будет сформирован сигнал «ЛОЖЬ», т.е. «0». В коммерческих областях применения, когда не требуется оценивать работу системы на основе частоты ошибок по битам, этот блок можно заменить на процессор цифровой обработки сигналов.

6. Светотехнические характеристики

Как отмечалось в разделе 2, светотехнические характеристики офисного пространства в целом определялись при помощи программы *DiaLux*. При этом вклад в освещение отгороженного рабочего места стороннего света (E_{AL}) и передатчика оптического излучения (E_{AP}) определялся по-отдельности. Было замечено, что основной вклад в освещение рабочей области вносит передатчик оптического излучения и что этот вклад не выходит за пределы отгороженного рабочего места, что сводит межканальные помехи к нулю. Общее пространство (коридор) освещено пятью расположенными на одном и том же расстоянии друг от друга КЛЛ, которые также приводят к появлению помех, создаваемых внешней засветкой. Результаты расчётов показали, что каждая из точек доступа вносит почти один и тот же вклад в освещение соответствующей рабочей области. Это вполне понятно в случае нескольких имеющих одинаковую геометрию отгороженных рабочих мест. Для подтверждения результатов расчётов и, что наиболее важно, для оценки качества связи было проведено исследование работы системы применительно к одному отгороженному рабочему месту.

Для измерения вклада передатчика оптического излучения, на рабочую область была вначале нанесена сетка

Рис. 9. Объёмное графическое изображение распределения освещённости в пределах рабочей области

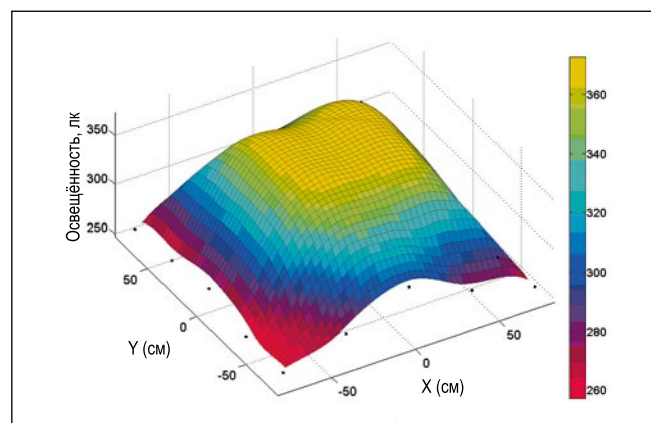
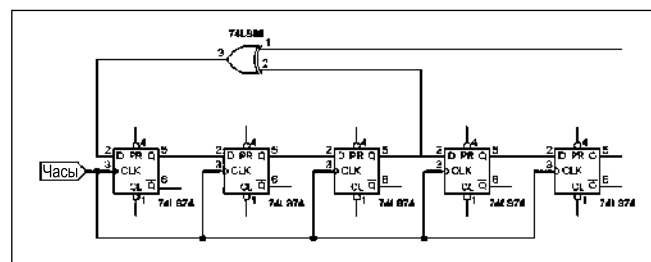


Рис. 10. Схема генератора последовательности случайных чисел



размером 5×5, в узлах которой при помощи люксметра проводились измерения освещённости (рис. 8). Средняя освещённость определялась как среднее арифметическое значений освещённости, измеренных во всех узлах сетки. Объёмное графическое изображение распределения освещённости, создаваемой передатчиком оптического излучения, приведено на рис. 9.

7. Качество связи

Для оценки качества связи, обеспечиваемой предлагаемой системой, светильник с СД был установлен на высоте 1 м над рабочей областью. Световой поток источника оптического излучения модулировали на основе входного потока двоичных данных. При этом амплитудная манипуляция осуществлялась при помощи управляемого входными данными УУ. Для оценки качества связи были проведены испытания двух типов, причём в случае оценки, проводившейся применительно к статическим условиям, случайные 7-битовые данные генерировались при помощи регистра сдвига и схемы «исключающее ИЛИ» (рис. 10).

Последовательность данных подаётся на вход данных предлагаемого УУ. Затем представленные модулированным световым потоком данные поступают на фотодиод при наличии естественного освещения, после чего при помощи осциллографа проводит-

ся сравнение переданной и принятой последовательностей данных. При этом обеспечивается совпадение тактовых частот передатчика и приёмника (30 кГц). Приведённые в разделе 8 результаты демонстрируют хорошее качество приёма передаваемых случайных данных даже при наличии создаваемого естественным светом шума.

Для оценки предлагаемой системы в реальном масштабе времени следует осуществить передачу непрерывного большого потока двоичных данных, которые должны приниматься приёмником оптического излучения при наличии помех, создаваемых сторонними источниками света. Процесс осуществляемой в реальном масштабе времени экспериментальной оценки качества связи на основе результатов измерений частоты ошибок по битам продемонстрирован на рис. 11. Результаты расчётов, проведённых в программе *DiaLux*, показали, что в пределах отгороженного рабочего места создаваемая сторонней засветкой максимальная освещённость 109 лк приводит к появлению помех и отрицательно сказывается на работе системы связи. Для экспериментального исследования устойчивости предлагаемого приёмника к воздействию сторонней засветки в качестве источника помех были использованы КЛЛ, и измерения частоты ошибок по битам были проведены при наличии этих создаваемых сторонними источниками света

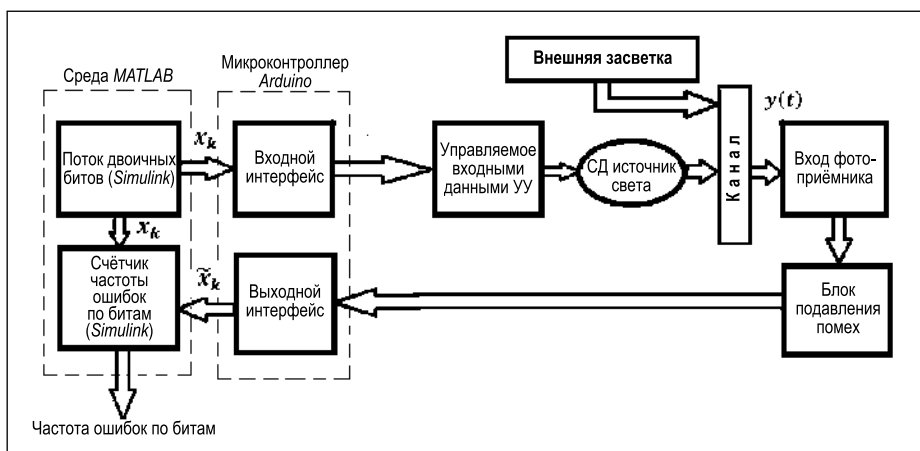


Рис. 11. Блок-схема измерения частоты ошибок по битам

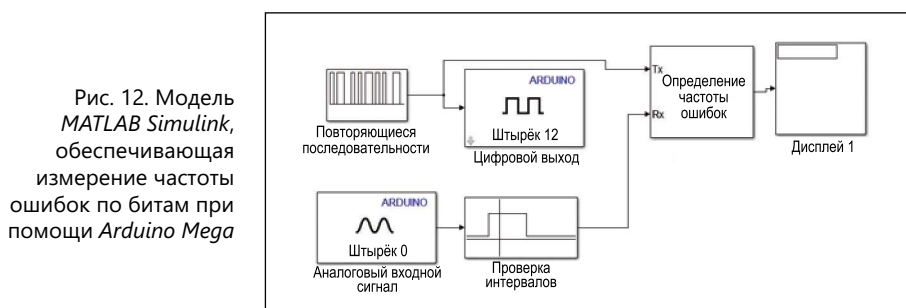


Рис. 12. Модель MATLAB Simulink, обеспечивающая измерение частоты ошибок по битам при помощи Arduino Mega

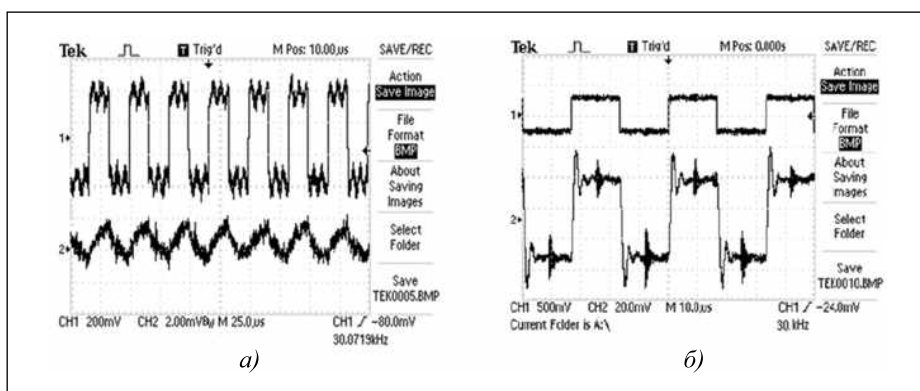


Рис. 13. Измеренные формы переданных и принятых сигналов, имеющих частоту 30 кГц

помех. Измерения проводились с использованием связанной с ARDUINO среды MATLAB Simulink.

Среда MATLAB Simulink играет здесь двойную роль. Во-первых, она обеспечивает генерацию больших потоков двоичных данных, используемых в качестве входных данных для разрабатываемого УУ, и во-вторых, во время приёма данных она обеспечивает расчёт частоты ошибок по битам. Сформированная в Simulink модель соединена с УУ через микроконтроллер Arduino (ATmega 2560). В свою очередь, штырёк «Цифровой выход» этого контроллера соединён со штырьком ввода данных УУ. Выходной сигнал первых двух блоков источника оптического излучения, который был опи-

сан в разделе 5, подаётся на штырёк ввода аналогового сигнала микроконтроллера ATmega 2560, который выступает в роли выходного устройства рассматриваемой системы. MATLAB Simulink осуществляет сравнение переданной последовательности битов $x(n)$ с принятой комбинацией битов $\bar{x}(n)$ и определяет частоту ошибок по битам. Модель Simulink, обеспечивающая генерацию и приём данных, представлена на рис. 12.

8. Результаты и обсуждение

Предварительные экспериментальные исследования разработанной системы были проведены с целью оценки её возможностей в части восстанов-

ления сигнала. Квадратные импульсы с частотой следования 30 кГц передавались посредством модуляции светового потока СД источника света. На рис. 13 приведены измеренные формы сигналов, переданных и принятых при отсутствии и наличии управляемого током усилителя напряжения. Эти формы сигналов говорят о важности управляемого током усилителя напряжения, что уже было отмечено в разделе 5.

В случае нулевых шумов и нулевых межсимвольных помех напряжение выходного сигнала схемы принятия решений $v_{out}(t)$ всегда должно быть больше порогового при отправлении единицы и меньше порогового при отправлении нуля. Однако при осуществлении связи в реальных условиях, которым соответствует предлагаемая система, имеют место отклонения от средних значений $v_{out}(t)$, обусловленные различными шумами, помехами, создаваемыми соседними импульсами, и т.д. При проведении предварительных исследований пороговое напряжение V_{th} было выбрано равным 50 мВ, что вдвое меньше измеренного в точках сетки минимального размаха напряжения.

Теоретическая, для расчёта частоты ошибок по битам используется гауссовская аппроксимация. При этом частота ошибок по битам описывается следующими эмпирическими соотношениями [28]:

$$BER = P_e(Q) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{Q}{\sqrt{2}}}^{\infty} e^{-x^2} dx = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (10)$$

$$Q = \frac{v_{th} - b_{off}}{\sigma_{off}} = \frac{b_{on} - v_{th}}{\sigma_{on}} = \frac{b_{on} - b_{off}}{\sigma_{on} + \sigma_{off}}. \quad (11)$$

Как отмечалось в разделе 7, оценка качества связи, обеспечиваемой предлагаемой системой, проводилась для реального канала связи как применительно к статическим условиям работы, так и в реальном масштабе времени. На рис. 14 приведены переданные и принятые последовательности битов 7-битовых случайных данных, которые использовались при проведении исследований. Из этого рисунка с очевидностью следует, что управляемый током усилитель напряжения с обратной связью и автоматической

Характеристики освещения различных рабочих областей

Рабочая область	Средняя горизонтальная освещённость, лк	Общая равномерность освещённости
Левая нижняя (C1)	311	0,73
Левая средняя (C2)	338	0,76
Левая верхняя (C3)	314	0,74
Правая нижняя (C4)	311	0,73
Правая средняя (C5)	338	0,76
Правая верхняя (C6)	314	0,74
Общий коридор	260	0,77

установкой на ноль успешно обнуляет смещение, обусловленное естественным освещением, и обеспечивает восстановление переданных данных.

В рамках исследований, проведённых в реальном масштабе времени по схеме, представленной на рис. 11, было получено, что при наличии естественного освещения частота ошибок по битам составляет порядка 10^{-8} . Однако эта ошибка возрастает при увеличении отношения сигнала к смеси помехи с шумом. Фильтр для подавления помех, который входит в состав приёмника, исключает большую часть гармоник, создаваемых сторонними источниками света. Но при этом всё ещё сохраняются некоторые высокочастотные составляющие, которые могут выступать в роли неустранимых внутренних шумов системы. Зависимости частоты ошибок по битам и отношения сигнала к смеси помехи с шумом от освещённости, создаваемой сторонними источниками света, приведены на рис. 15.

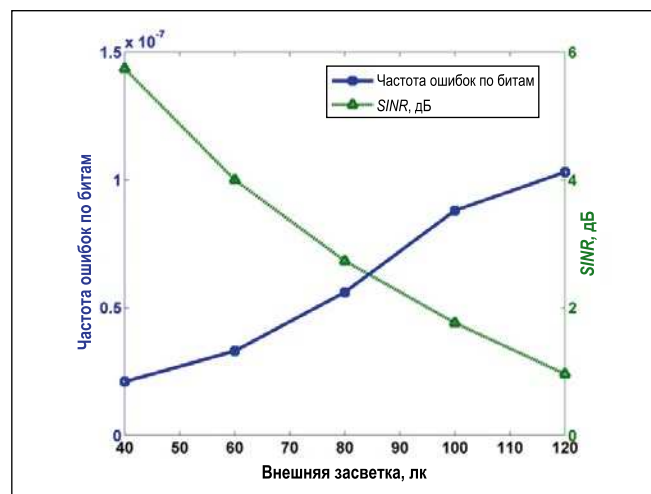
Измерения распределения освещённости показали, что средняя освещённость рабочей области в пределах отгороженного рабочего места составляет 231,9 лк. Расчёты в программе *DiaLux* были проведены для всего офиса в целом с учётом упомянутого вклада передатчика оптического излучения и сторонней засветки. Пять КЛЛ, установленные для освещения общего коридора, также вносят свой вклад в освещение рабочих областей всех отгороженных рабочих мест. Приведённые в табл. 3 результаты расчётов демонстрируют приемлемость освещения всех отгороженных рабочих мест и коридора в части горизонтальной освещённости и её общей равномерности. Вследствие симметричной компоновки помещения и расположения светильников распределения освещённости в пределах расположенных напротив друг друга отгороженных рабочих мест оказались почти идентичными. Изолюксы для рабочей области (в пределах отгороженного рабочего места C3) и общего коридора приведены на рис. 16.

Результаты расчётов показали, что вклад сторонних источников света в освещение рабочей области в пределах отгороженного рабочего места меняется от 41 до 109 лк. При увеличении сторонней засветки рабочей области отношения сигнала к смеси помехи с шумом постепенно умень-

Рис. 14. Измеренные конфигурации переданных и принятых битов (при наличии естественного света)



Рис. 15. Зависимости частоты ошибок по битам и отношения сигнала к смеси помехи с шумом (SINR) от уровня внешней засветки



шается от 5,94 до 0,96 дБ. Однако экспериментальные результаты демонстрируют приемлемый – порядка 10^{-7} – уровень частоты ошибок по битам в пределах этого интервала. На основе этих результатов можно показать, что предлагаемая система обеспечивает более хорошее, чем в [16], качество связи в части частоты ошибок по битам и скорости передачи данных.

9. Заключение

Оптическая беспроводная передача данных с использованием некогерентных источников света осуществ-

ляется посредством многоуровневой импульсной модуляции светового потока и непосредственного приёма излучения. Для этого предлагается использовать совокупность дешёвого управляемого входными данными УУ и соответствующего ему приёмника оптического излучения. Основная цель данной работы заключалась в заполнении зазора между освещением и связью, который был выявлен в результате рассмотрения соответствующей литературы. Нами был предложено перспективное с точки зрения VLC светотехническое решение, которое может быть использовано в офисах.

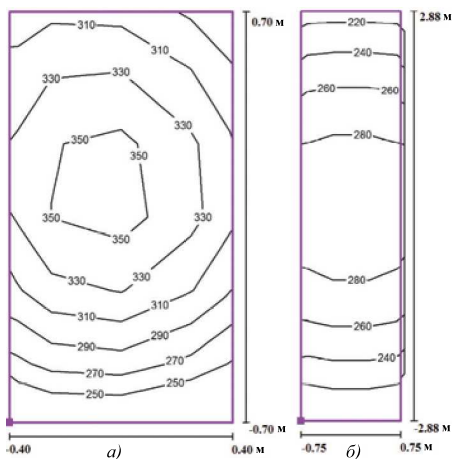


Рис. 16. Изолюксы для: (а) рабочей области в пределах отгороженного рабочего места, (б) общего коридора

Помимо передачи данных, все точки доступа вносят вклад в освещение рабочих областей, тогда как источники света, предназначенные исключительно для освещения, создают помехи. Принимающая излучение часть предлагаемой системы ограничивает величину частоты ошибок по битам уровнем порядка 10^{-7} даже при наличии помех, создаваемых сторонней засветкой. При этом средняя горизонтальная освещённость и её равномерность удовлетворяют рекомендациям МКО/ИСО в пределах всех рабочих областей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Narendran, N., Gu, Y. Life of LED-based white light sources // Journal of display technology. – 2005. – Vol. 1, No. 1. – P. 167–171.
2. Kocaman, B., Rüstemli, S. COMPARISON OF LED AND HPS LUMINAIRES IN TERMS OF ENERGY SAVINGS AT TUNNEL ILLUMINATION // Light & Engineering. – 2019. – Vol. 27, No. 3. – P. 67–74.
3. Кокаман Б., Рустемли С. Сравнение светильников со светодиодами и натриевыми лампами высокого давления при освещении тоннелей // Светотехника. – 2019. – № 1. – С. 62–68.
4. Amelkina, S.A., Zheleznikova, O.E., Sinit-syna, L.V. ON THE EFFICIENCY OF LIGHTING BY LEDS IN VISUAL WORK // Light & Engineering. – 2018. – Vol. 26, No. 3. – P. 81–87.
5. Амелькина С.А., Железникова О.Е., Синицына Л.В. Об эффективности освещения светодиодами по зрительной работе // Светотехника. – 2018. – № 2. – С. 6–10.
6. Green, R.J., Joshi, H., Higgins, M.D., Lee-son, M.S. Recent developments in indoor optical wireless systems // IET communications. – 2008. – Vol. 2, No. 1. – P. 3–10.

7. Gancarz, J., Elgala, H., Little, T.D. Impact of lighting requirements on VLC systems // IEEE Communications Magazine. – 2013. – Vol. 51, No. 12. – P. 34–41.

8. Chatterjee, S., Sabui, D. Daylight integrated indoor VLC architecture: An energy-efficient solution // Trans Emerging Tel Tech. – 2019. – e3800.

9. Markov, M., Grigoriev, Y.G. Wi-Fi technology—an uncontrolled global experiment on the health of mankind // Electromagnetic biology and medicine. – 2013. – Vol. 32, No. 2. – P. 200–208.

10. Miyahara, S., Aono, S., Matsumoto, Y. Preproduction of LED driver for visible light communications and evaluation of response performance of visible LED // Technical report of IEICE, ICD2005-44. – 2005. – P. 25–30.

11. O'Brien, D.C., Faulkner, G., Le Minh, H., Bouchet, O., El Tabach, M., Wolf, M., Langer, K.D. et al. Home access networks using optical wireless transmission // In 2008 Proc. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, September 2008. – P. 1–5.

12. Vučić, J., Kotke, C., Nerreter, S., Langer, K.D., Walewski, J.W. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED // Journal of lightwave technology. – 2010. – Vol. 28, No. 24. – P. 3512–3518.

13. McKendry, J.J., Massoubre, D., Zhang, S., Rae, B.R., Green, R.P., Gu, E., Dawson, M.D. Visible-light communications using a CMOS-controlled micro-light-emitting-diode array // Journal of lightwave technology. – 2011. – Vol. 30, No. 1. – P. 61–67.

14. Elgala, H., Mesleh, R., Haas, H. Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art // IEEE Communications Magazine. – 2011. – Vol. 49, No. 9. – P. 56–62.

15. Sindhubala, K., Vijayalakshmi, B. SURVEY ON NOISE SOURCES AND RESTRAIN TECHNIQUES IN VISIBLE-LIGHT COMMUNICATION // Light & Engineering. – 2016. Vol. 24, No. 2. – P. 107–117.

16. Sindhubala, K., Vijayalakshmi, B. DESIGN AND IMPLEMENTATION OF OPTICAL RECEIVER FOR VISIBLE LIGHT COMMUNICATION TO REDUCE AMBIENT LIGHT NOISE // Light & Engineering. – 2017. – Vol. 25, No. 2. – P. 139–146.

17. Din, I., Kim, H. Energy-Efficient Optical Power Control For Data Rate And Illuminance Provision In Visible Light Communication // Light & Engineering. – 2016. – Vol. 24, No. 2. – P. 89–95.

18. Дин И., Ким Х. Энергоэффективное управление мощностью оптического излучения в беспроводной связи через видимый свет // Светотехника. – 2016. – № 2. – С. 19–23.

19. Ho, S.W., Duan, J., Chen, C.S. (2017). Location-based information transmission systems using visible light communica-

tions // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. – 2017. – Vol. 28, No. 1. – e2922

20. ISO-8995-1:2002 (CIE-S008/E:2001).

21. Kahn, J.M., Barry, J.R. (1997). Wireless infrared communications // Proc. of the IEEE. – 1997. – Vol. 85, No. 2. – P. 265–298.

22. Chen, Y., Sung, C.W., Ho, S.W., Wong, W.S. BER analysis and power control for interfering visible light communication systems // Optik. – 2017. – Vol. 151, No. 12. – P. 98–109.

23. Afgani, M.Z., Haas, H., Elgala, H., Knipp, D. Visible light communication using OFDM // Proc. of the 2nd Int. Conf. on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, March 2006. – TRIDENTCOM 2006. (pp. 6-pp).

24. Gfeller, F.R., Bapst, U. Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation // Proceedings of the IEEE. – 1979. – Vol. 67, No. 11. – P. 1474–1486.

25. Komine, T., Nakagawa, M. (2004). Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights // IEEE transactions on Consumer Electronics. – 2004. – Vol. 50, No. 1. – P. 100–107.

26. Texas Instruments, «60-W Common Anode-Capable Constant Current Buck LED Driver,» LM3414, LM3414HV datasheet, June 2010 [Revised November 2015].

27. Moreira, A.J., Valadas, R.T., de Oliveira Duarte, A.M. Optical interference produced by artificial light // Wireless Networks. – 1997. – Vol. 3, No. 2. – P. 131–140.

28. Keiser G. Optical fiber communications. Wiley Encyclopedia of Telecommunications. 2003, Apr 15.



Суриш Чаттерджи (Sourish Chatterjee)

Окончил Джадавпурский университет (2011 г.). Область научных интересов: передача данных видимым светом. Член Общества инженеров (Индия)



Бисванат Рой (Biswanath Roy)

Ph.D. (1999 г.). Профессор электротехнического факультета Джадавпурского университета, Индия. Пожизненный член Индийского светотехнического общества и Общества инженеров (Индия), член Североамериканского светотехнического общества (IESNA)

общества и Общества инженеров (Индия), член Североамериканского светотехнического общества (IESNA)